



Kraków, 14 września 2023

Silnie intrygujące szczegóły zderzeń przy ekstremalnych energiach

Wstępne fazy zderzeń ciężkich jonów, zachodzące przy maksymalnych energiach dostępnych w akceleratorze LHC, wciąż pozostają enigmą współczesnej fizyki jądrowej. Rąbka skrywanej przez naturę tajemnicy pomogą uchylić nowe narzędzia teoretyczne, udoskonalone przez fizyków z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie.

Zjawiska zachodzące podczas zderzeń jąder atomowych przebiegają tak szybko i z udziałem cząstek tak małych, że nie można ich obserwować bezpośrednio. Odgadywanie przebiegu takich procesów przypomina pracę detektywa. Tak jak on nie może zobaczyć momentu zbrodni i musi odtworzać jej obraz na podstawie zeznań świadków, tak fizycy próbują rekonstruować przebiegi zjawisk jądrowych na podstawie „relacji” zdawanych przez cząstki wtórne, które narodziły się w zderzeniach i zostały zarejestrowane przez detektory. Sherlock Holmes miał jednak zadanie po wielokroć łatwiejsze: ze swoimi świadkami swobodnie rozmawiał. Tymczasem fizycy mogą jedynie obserwować zachowania cząstek. Aby zrekonstruować rzeczywisty przebieg „zbrodni” (zderzenia jąder atomowych), sami muszą stworzyć odpowiedni język opisu wydarzeń (narzędzia matematyczne), by później w nim je zrelacjonować (za pomocą modelu teoretycznego zjawiska), a następnie porównać, czy tak otrzymane „zeznanie” zgadza się z tym, co wydają się „mówić” zarejestrowane cząstki.

Do procesów szczególnie trudnych do badania należą zjawiska zachodzące we wczesnych etapach zderzeń ciężkich jonów w akceleratorze LHC, kiedy to może dojść do formowania się plazmy kwarkowo-gluonowej. Jest to stan materii, w którym kwarki i gluony zachowują się jak cząstki swobodne (w otaczającym nas świecie kwarki i gluony zawsze są związane oddziaływaniem silnym i pozostają we wnętrzach hadronów, czyli protonów bądź neutronów). Plazma kwarkowo-gluonowa istnieje tylko przez ekstremalnie krótką chwilę, ponieważ podczas rozszerzania się gwałtownie stygnie. Kwarki i gluony zostają wtedy na powrót uwięzione w hadronach, tworząc cząstki wtórne, rejestrowane w detektorach. O tym, czy doszło do powstania plazmy kwarkowo-gluonowej, można wnioskować analizując tak zwane korelacje przód-tył między cząstkami wyprodukowanymi w zderzeniach.

„Korelacje przód-tył mierzą zależności między liczbą cząstek wyprodukowanych do przodu i do tyłu podczas zderzenia przeciwbieżnych wiązek ciężkich jonów. Co prawda zależności te dotyczą cząstek bardzo oddalonych od siebie, jednak niosą informacje o wczesnym etapie zderzenia. Dzieje się tak, ponieważ korelacja między cząstkami wyemitowanymi do przodu i do tyłu mogła powstać tylko zanim cząstki te się od siebie oddaliły, czyli na początku zderzenia!”, mówi dr Iwona Sputowska z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, fizyczka należąca do kolaboracji naukowej ALICE przy akceleratorze LHC.

Problem z korelacjami polega jednak na tym, że użyte nieumiejętnie mogą prowadzić do fałszywych wniosków. Przypuśćmy bowiem, że we wszystkich klasach szkoły podstawowej prowadzimy badania nad inteligencją dzieci. Można wtedy zauważyć korelację, że dziecko jest tym bardziej inteligentne, im więcej... waży. Wiemy jednak, że w rzeczywistości inteligencja i waga są zależne do innej wielkości: wieku dziecka. Jeśli więc zawężymy nasze badania do dzieci w tym samym wieku,

korelacja między ich inteligencją a wagą dramatycznie spadnie. Korelacja między inteligencją a wagą jest więc wrażliwa na fluktuacje wieku w grupie dzieci: w całej szkole jest dużo dzieci w różnym wieku, ale już w obrębie tej samej klasy różnice wiekowe są małe.

Analogiczne wyzwanie napotykamy badając korelacje w zderzeniach ciężkich jonów. Relacja między liczbą cząstek wyprodukowanych do przodu i do tyłu jest wrażliwa na fluktuacje sposobu, w jaki dwa jądra atomowe zderzyły się ze sobą, na przykład czy zderzyły się czołowo, czy tylko się musnęły. Aby uporać się z tym problemem wprowadzono pojęcie zmiennych silnie intensywnych. Wielkości te definiuje się tak, aby nie zależały ani od tego, w jaki sposób dwa jony zderzyły się ze sobą, ani od tego, jak bardzo sposób zderzenia fluktuował w badanej grupie przypadków.

Silnie intensywną zmienną korelacyjną jest sigma. W założeniach miała ona nieść informację o sposobie, w jaki uśrednione źródło produkuje cząstki wtórne. Jednak w trakcie analizowania danych, zebranych w zderzeniach jąder ołowiu z ołowiem i ksenonu z ksenonem w ramach eksperymentu ALICE, dr Sputowska zauważyła, że żaden z najbardziej popularnych modeli, używanych do opisu tych zjawisk, nie odtwarza zachowania zmiennej sigma.

„Wniosek mógł być tylko jeden. Skoro nasze modele nie opisują poprawnie danych eksperymentalnych dla zderzeń o największych energiach dostępnych w LHC, to znaczy, że źle modelujemy, jak średnie źródło wytwarza cząstki wtórne!”, mówi dr Sputowska.

Nieoczekiwanie, pomocne w zrozumieniu zachowania sigmy okazały się modele zderzeń zaproponowane ponad 45 lat temu przez krakowskich teoretyków. Potraktowali oni zderzenia ciężkich jąder atomowych jako wielokrotne kolizje pojedynczych nukleonów jednego jądra z pojedynczymi nukleonami drugiego jądra (w modelu zranionych nukleonów) bądź jako kolizje nie protonów i neutronów, lecz kwarków (w modelu zranionych kwarków). W modelach tych zakłada się, że za produkcję cząstek wtórnych odpowiadają pojedyncze, niezależne źródła, którymi są odpowiednio albo nukleony, albo kwarki.

W dotychczasowych modelach przyjmowano, że średnie źródło generuje cząstki wtórne z takim samym prawdopodobieństwem do przodu i do tyłu. Sigma z definicji powinna być wtedy równa jeden. Okazuje się, że jej rzeczywiste zmiany w zależności od geometrii zderzenia można odtworzyć wtedy, gdy dopuści się możliwość, że średnie źródło emituje cząstki w przód z nieco innym prawdopodobieństwem niż w tył. W modelu zranionych nukleonów we wzorze na sigmę pojawia się wówczas dodatkowy człon zależny od geometrii zderzenia i sigma przestaje być zmienną silnie intensywną.

Rodzi się tu jednak intrygującą sprzeczność. Sigma traci bowiem status zmiennej silnie intensywniej, a mimo to nadal poprawnie opisuje dane doświadczalne, które nie zależą od zmian geometrii zderzenia. Dlaczego? Odpowiedź tkwi w fakcie, że w modelu zranionych źródeł sigma zawsze podaje wartość korelacji przód-tył dla średniej liczby zranionych nukleonów/kwarków, czyli dla średniej geometrii zderzenia w danej grupie zderzeń. Można tę sytuację porównać do pomiaru korelacji między inteligencją a wagą dzieci w grupie, w której średnia wieku dziecka jest stała.

„Szczegółowe zrozumienie natury sigmy pozwoliło wyznaczyć funkcję fragmentacji, wiążącą liczbę cząstek produkowanych przez nukleony w modelu z liczbą cząstek mierzonych w detektorach. Po raz pierwszy dla maksymalnych energii zderzeń w LHC udało się skonstruować narzędzia pozwalające wiarygodnie falsyfikować to silnie intrygujące zachowanie sigmy”, podsumowuje dr Sputowska.

Osiągnięcie dr Sputowskiej zostało przedstawione w artykule opublikowanym w czasopiśmie „*Physical Review C*”. Badania sfinansowano ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Institut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie prowadzi badania podstawowe i aplikacyjne w obszarze fizyki oraz nauk pokrewnych. Główna część działalności naukowej Instytutu koncentruje się na badaniu struktury materii, w tym własności oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po cząstki elementarne. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek, obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN prowadzi też cztery akredytowane laboratoria badawcze i pomiarowe. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fizykę fazy skondensowanej materii, fizykę medyczną, inżynierię nanomateriałów, geofizykę, biologię radiacyjną i środowiskową, radiochemię, dozymetrię oraz fizykę i ochronę środowiska – są każdego roku przedstawiane w ponad 600 artykułach publikowanych w recenzowanych wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Corocznie Instytut jest organizatorem lub współorganizatorem wielu międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych oraz

szeregu seminariów i innych spotkań naukowych. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość”, któremu, na lata 2012-2017, nadany został status Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW). Wiele projektów i przedsięwzięć realizowanych przez Instytut jest wpisanych na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej (PMIB). Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. Komisja Europejska przyznała IFJ PAN prestiżowe wyróżnienie „HR Excellence in Research” jako instytucji stosującej zasady „Europejskiej Karty Naukowca” i „Kodeksu Postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych”. W klasyfikacji MEiN Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w obszarze nauk fizycznych.

KONTAKT:

dr Iwona Sputowska
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628072
email: iwona.sputowska@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Forward-backward correlations with the Σ quantity in the wounded-constituent framework at energies available at the CERN Large Hadron Collider”
I. A. Sputowska
Physical Review C 108, 1, 014903, 2023
DOI: [10.1103/PhysRevC.108.014903](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.108.014903)

POWIĄZANE STRONY WWW:

<http://www.ifj.edu.pl/>
Strona Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk.

<http://press.ifj.edu.pl/>
Serwis prasowy Instytutu Fizyki Jądrowej PAN.

MATERIAŁY GRAFICZNE:

IFJ230914b_fot01s.jpg HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2023/09/14/IFJ230914b_fot01.jpg
Inteligencja dzieci może wyglądać na statystycznie zależącą od ich wagi, ponieważ zależność jest czuła na fluktuacje wieku w obrębie badanej grupy. Analogicznie zjawisko występuje w przypadku zmiennej korelacyjnej sigma i geometrii zderzeń ciężkich jonów w akceleratorze LHC. (Źródło: IFJ PAN)